高压直流干扰下 X80 钢在广东土壤中的干扰参数变化规律及腐蚀行为研究

秦润之 [1] 杜艳霞 [1] 路民旭 [1] 欧 莉 [2] 孙海明 [2]

1 北京科技大学新材料技术研究院 北京 100083

2 中石化石油工程设计有限公司 东营 257026

摘 要 通过室内模拟实验考察了在大幅高压直流干扰电压下，X80 钢在广东土壤中的干扰电流密度变化规律及腐蚀行为。结果表明，在 50~300 V 直流干扰电位下，电流密度随时间呈现典型的 3 阶段变化特征：先在几秒内急剧上升到较高水平的峰值，然后在几百秒内下降到较低水平的稳定值，最后维持在稳定值上下较长时间。结合干扰过程中试样附近土壤温度、含水率及电阻的测试分析表明，电流密度变化主要是因为大幅干扰电压造成短时间内试片周围土壤温度升高，含水率降低，局部电阻率大幅增加所致。同时实验获得直流干扰电位分别为 50、100、200 及 300 V 情况下，对应的 X80 钢腐蚀速率分别为 5.56、7.85、10.63 及 7.78 μm/h；腐蚀速率随直流干扰电位的升高呈现先增大后减小的趋势，该趋势不同于电流密度峰值随直流干扰电位的变化规律，但与电流密度稳定值随直流干扰电位的变化规律相似。此外分析了高压直流干扰下试样失重腐蚀速率与 3 种形式电流密度理论计算值之间的相关性，结果表明利用高压直流干扰过程中电流密度变化曲线积分计算得到的腐蚀速率与失重腐蚀速率误差最小；其次为利用电流密度稳定值计算得到的腐蚀速率；利用电流密度峰值计算得到的腐蚀速率与失重腐蚀速率误差最大，可达到失重腐蚀速率的若干倍。据此提出了实际高压直流干扰下参数监测与腐蚀速率的预测方法。

关键词 高压直流，直流干扰，腐蚀速率，电流密度，变化规律

中图分类号 TG178 **文章编号** 0412-1961(2018)00−0000−00

Study of Interference Parameters Variation Regularity and Corrosion Behavior of X80 Steel in Guangdong Soil under High Voltage Direct Current Interference

QIN Runzhi [1], DU Yanxia [1], LU Minxu [1], OU Li [2], SUN Haiming [2]

1 Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2 Sinopec Petroleum Engineering Corporation, Dongying 257026, China

Correspondent: DU Yanxia, associate professor, Tel: (010)62333972, E-mail: duyanxia@ustb.edu.cn

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2016YFC0802101)

Manuscript received 2017-07-24, in revised form 2017-10-21

ABSTRACT High voltage direct current transmission (HVDC) systems develop fast in China in these years. The ground electrodes of HVDC systems could inject/absorb large amount of DC current into/from soil, introducing DC interference to nearby pipelines. The pipeline could have remarkable pipe-to-soil potential shift, and have high risks of corrosion. In this work, indoor HVDC simulation experiments were carried out based on the field test in recent years. Under high voltages, the variation regularity of DC density and the corrosion behavior of X80 steel in Guangdong soil were studied. The result showed that under 50, 100, 200 and 300 V DC voltages, the DC

资助项目 国家重点研发计划项目 No. 2016YFC0802101

收稿日期 2017-07-24 **定稿日期** 2017-10-21

作者简介 秦润之，男，1990 年生，博士生

通讯作者 杜艳霞，duyanxia@ustb.edu.cn，主要从事阴极保护及杂散电流干扰方面的研究

DOI 10.11900/0412.1961.2017.00311

density of the coupons had the same trend and could be divided into 3 stages. Firstly, the DC density climb to peak sharply in several seconds. Then, the DC density decreased gradually to steady value in hundreds of seconds. Lastly, the DC density stayed at that level for the rest of time. The local environment was monitored. The results indicated the variation of the DC density was mainly related to the local soil temperature increment, water content decrement and the substantially growth of the spread resistance. After the interference, the corrosion rates were measured to be 5.56, 7.85, 10.63 and 7.78 μm/h, respectively. The corrosion rates with interference voltages increased first and then decreased, same with the steady value of DC density, but different from peak value. Furthermore, 3 methods of calculating corrosion rates were studied. The values calculated by integration of DC density curve had the smallest errors compared with the measured ones. Using steady DC density had bigger errors and using peak DC density could led to biggest errors. Based on the result, the method of predicting HVDC corrosion rate was proposed.

KEY WORDS HVDC, DC interference, corrosion rate, current density, variation regularity

高压直流输电(HVDC)是利用稳定的直流电进行电力传输的一种高电压、大功率、远距离的输电技术。1954 年在瑞典诞生了世界上第一条商业化的高压直流输电工程，随后欧洲、北美、前苏联、日本、巴西等国家和地区陆续修建了多个 HVDC 工程。HVDC 具有容量大、损耗小、杆塔结构简单、线路造价低等显著优点，特别适合中国“西电东送”、“北电南送”等大型能源工程，因此在我国发展迅速。从上世纪八十年代起，已建立了天生桥-广州、三峡-上海、哈密-郑州等十几条 HVDC 线路，并且在“十三五”和“一带一路”等国家战略中提出了更多 HVDC 规划[1~6]。

HVDC 主要有双极运行和单极运行 2 种运行模式，其中双极运行可认为两套单极运行的耦合，在检修或故障时会自动转入单极运行模式。当以单极大地回线方式运行时，使用大地作为一根导线，大量直流电流由一端接地极注入大地并沿大地流向另一端接地极。入地电流可以被埋地金属结构物吸收、传递、释放，造成严重的直流干扰，带来人身伤害、设备损坏和金属腐蚀的风险。

国外报道了高压直流输电系统接地极单极运行对埋地管道干扰的案例，如北美 Trans Mountain 原油管道受附近 260 kV 高压直流输电工程干扰时，管地电位可偏移 400 mV[7]；Quebec-New England Intertie 高压直流系统对周围带来直流干扰，附近原油和天然气管道的管地电位可偏移 900 mV[8]；巴西某灌溉管道受 3 km 外的 Ibiúna 接地极干扰，管地电位最高可偏移 46 V[9]；当管地电位正向偏移较高时，管道金属腐蚀的风险增大，如 Hopper 等[10]进行高压直流干扰的模拟实验研究表明，管道漏点处泄漏电流密度比平均泄漏电流密度大 4~6 个数量级，而且小漏点受干扰更大，在模拟实验中当管地通电电位为 15 V (*vs* SCE)，且漏点为 0.134 m^2 时，漏点的泄漏电流密度达 23.681 A/m^2，当漏点尺寸为 0.0134 m^2 时，漏点电流密度达 94.19 A/m^2，管道腐蚀速率达 109.25 mm/a。

近年来，随着我国高压直流输电工程的陆续投运，国内埋地管道受高压直流干扰的问题不断暴露出来，如西气东输新疆段受哈郑高压直流输电工程干扰，当哈密接地极单极运行时，管地通电电位可达+0.5 V (*vs* SCE)[11]；西气东输芙蓉-上海段受到三沪直流输电工程干扰，当腰泾接地极单极运行时，阴极保护系统输出异常，无锡以西管道电位大幅正向偏移，管地电位最高达+830 mV；广东省天然气管网受云广高压直流输电工程干扰，当鱼龙岭接地极单极运行时，多台阴极保护系统烧坏，管地电位大幅偏移，最正可达+20 V[12]；广东某管道受临近高压直流工程干扰，当附近接地极单极运行时，管地电位最高可达 150 V[13]；西气东输广东段受天广直流输电工程的干扰，管地电位最高可达 304 V (*vs* SCE)，管道运行受到重大威胁[14]。

我国高压直流工程输电容量大、电压等级高、入地电流大，而且地下管网密集，埋地管道易受干扰，同国外高压直流干扰案例相比，我国的案例明显具有干扰参数幅值高、影响范围大等特点。在这种大幅值的高压直流干扰下，埋地管道的腐蚀风险尚不清晰，对此干扰下的腐蚀过程缺乏系统的研究，同时国内外尚无针对高压直流干扰有效检测、评判及防护方面的标准。现实中输电工程和管道工程不断投运，管道受高压直流干扰形势日益严峻，急需对高压直流干扰下管道金属的腐蚀行为开展相关研究。

本工作基于现场测试的 HVDC 干扰参数，通过干扰模拟实验、干扰参数监测、局部环境与腐蚀产物测试等多种实验方法，对大幅值 HVDC 干扰下 X80 管线钢在我国广东某土壤环境中的腐蚀行为进行了研究，

以期为 HVDC 干扰腐蚀风险的认识与评估提供参考。

1 实验方法

实验材料选取 X80 管道钢，从某长输管道服役现场运回，其主要化学成分(质量分数，%)为：C 0.070, Mn 1.61, Si 0.21, Ni 0.12, Cu 0.14, Nb 0.041, Ti 0.012, S 0.0025, P 0.0081, Mo 0.13，Fe 余量。试样尺寸为直径 18.0 mm×高 3 mm，实验前用 SiC 水磨砂纸从 360 号逐级打磨至 1000 号，再用丙酮和无水乙醇依次除油，用去离子水冲洗后吹干待用。实验时采用聚四氟乙烯夹具固定试样，金属暴露面积为 1 cm^2。

实验所用土壤为广东红褐色黏土，现场取土深度为 1 m，土壤含水率为 21%，土壤电阻率为 24.2 Ω·m，土壤离子浓度折合为无机盐含量 (浓度，mg/L) 为：NaCl 0.0114, $CaCl_2$ 0.0071, $MgCl_2$ 0.0016, $NaHCO_3$ 0.0017, Na_2SO_4 0.0291, KCl 0.0019, $NaNO_3$ 0.0286。

实验装置为自行搭建的高压直流干扰土壤腐蚀模拟实验装置。该装置由土壤实验箱、干扰回路和测试回路构成，如图 1 所示。土壤实验箱尺寸为 20 cm×10 cm×8 cm，由工作电极 X80 钢试样(WE)、饱和甘汞参比电极(RE)、辅助电极铜板(CE)组成三电极体系，浸没在实验土壤中，试样表面 1 cm 处放置温度计以测试干扰过程中的温度变化；由 HSPY 400-01 型高压直流干扰电源连接工作电极与辅助电极，构成直流干扰回路，干扰回路中串联有 10 Ω 的分流电阻和电压表，用于评估直流电流，结合试样暴露面积获得直流电流密度；由 Reference 3000 型电化学工作站连接三电极体系构成测试回路，在施加干扰前后测试了土壤扩散电阻的变化。

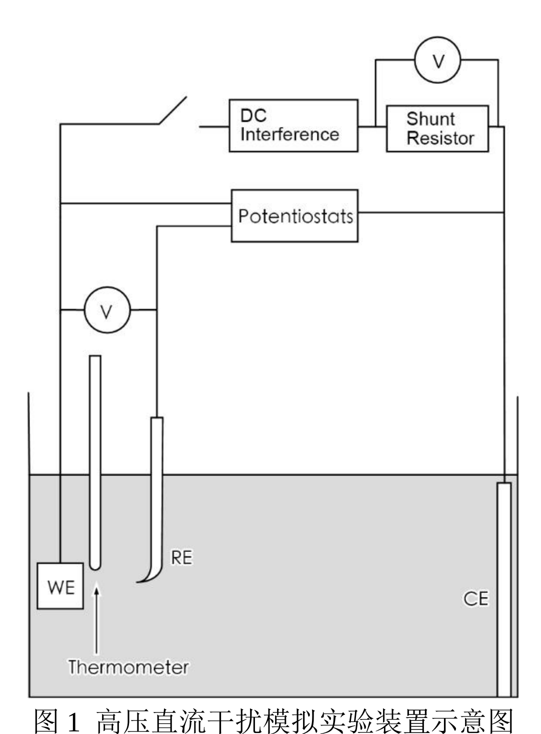


图 1 高压直流干扰模拟实验装置示意图

Fig.1 Schematic of high voltage direct current (HVDC) interference and test system

实验装置搭建完成后静置 2 h，待 X80 钢试样开路电位稳定后，通过高压直流干扰电源施加 50、100、200、300 V 干扰电位 1 h。通过测试分流电阻两端电压获得回路中电流，结合试样面积求解出试样干扰电流密度。

为了考察高压直流干扰过程中试样周围局部土壤环境的变化，测试了土壤扩散电阻、温度、含水率等参数的变化。其中土壤扩散电阻 R_{soil} 代表试片到参比电极之间的电阻，与试样形状、尺寸、试片表面土壤电阻率等因素相关，当外电流较高或土壤电阻率较高时，用参比电极测量得到的金属试片电位中包含了较高数量级的土壤电压降，此 Ohm 电位降不可忽略[15,16]，可以使用外加交流扰动的方法测试[17~20]，如下式所示：

$$R_{soil} = \frac{U_{AC}}{J_{AC}A} \tag{1}$$

式中，U_{AC}是试样的通电交流电位，J_{AC}是流经试样的交流电流，A是试样面积。高压直流干扰过程中，通过电化学工作站测试片和参比电极之间扩散电阻的变化，扰动交流电流密度为 0.0001 A/cm^2 (均方根值)，交流频率 50 Hz。

同时，使用温度计监测干扰过程中试样表面土壤温度变化。干扰结束后，将距试样表面 0.5、1、10 cm 处土壤取出，测试土壤含水率变化。

干扰结束后观察腐蚀形貌，然后使用 LabRAM HR Evolution 型显微 Raman 光谱仪对试样表面腐蚀产物进行成分分析，激发波长 532 nm，波束直径 0.1 μm，为避免激光光束造成试样表面温度升高，输出功率小于 1 mW。

在超声波清洗机中，使用除锈液(500 mL 去离子水+500 mL 浓盐酸+4~5 g 六次甲基四胺)对试样进行除锈，使用丙酮进行清洗，最后用去离子水冲洗吹干，使用精度为 0.0001 g 的电子天平进行称重以获得腐蚀失重。利用以下公式计算实验周期内腐蚀速率 V：

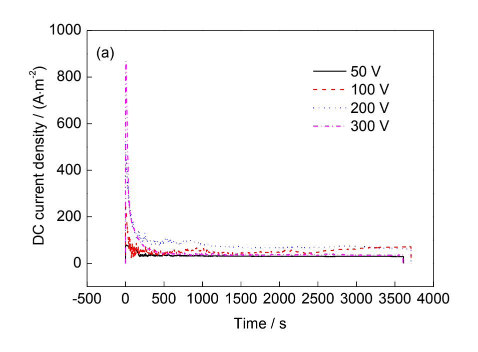
$$V = \frac{W_b - W_a - \Delta W_0}{t\rho A} \tag{2}$$

式中，W_b为干扰前试样质量，W_a为干扰后试样质量，ΔW_0为除锈过程中空白样失重，t为实验周期，ρ为试样密度。

2 实验结果

2.1 高干扰电压下 X80 钢干扰电流密度测试结果

广东土壤中 X80 钢试样在 50～300 V 直流电位干扰下，腐蚀电流密度如图 2 所示。由图 2a 可知，在不同的干扰电压下，电流密度随时间的变化曲线有相似的规律，均出现干扰初期电流密度较高，一段时间后电流密度大幅降低的现象。以图 2b 干扰电压为 300 V 时为例，电流密度曲线大致可分为三个阶段。阶段 1：电流密度上升阶段。施加干扰后 3 s 内，干扰电流密度迅速上升到峰值，峰值大小为 868.5 A/m^2。阶段 1 的特点是时间短，电流密度上升快。阶段 2：电流密度下降阶段。达到峰值后，电流密度快速下降，经过 480 s 后达到较稳定数值。阶段 2 的特点是电流密度下降呈指数型，下降速率随时间逐渐降低。阶段 3：电流密度稳定阶段。干扰电流密度较稳定，维持在 36 A/m^2 上下，略有波动但幅度不大，直至实验结束。阶段 3 的特点是电流密度值较低，仅为峰值的 1/24，但持续时间较长。



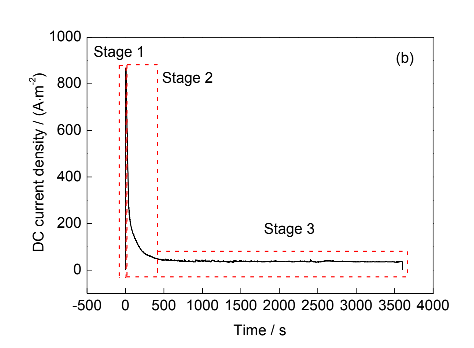


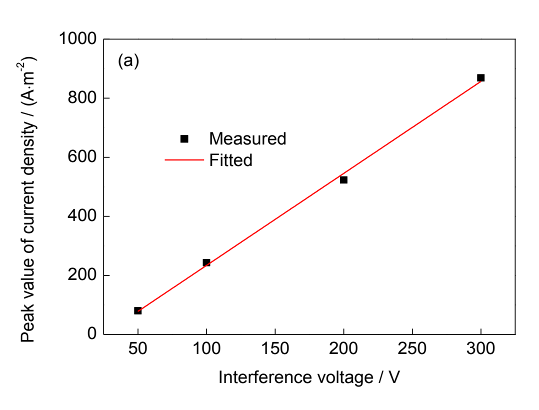
图 2 X80 钢试样在 50~300 V 直流干扰电压下直流电流密度随时间的变化曲线

Fig.2 Direct current (DC) density of X80 coupon under 50~300 V (a) and 300 V with 3 stages (b)

2.2 直流干扰电流密度随干扰电压的变化规律

尽管不同直流干扰电压下电流密度的变化规律是类似的，但阶段 2 中电流密度峰值与阶段 3 中电流密度的稳定值随干扰电压的不同而呈现不同的趋势。图 3a 为阶段 2 的峰值电流密度随干扰电压的变化，可以看出，峰值电流密度随干扰电压的升高而升高，近似呈线性关系，当干扰电压为 300 V 时峰值电流密度达到最高，为 868.5 A/m^2。图 3b 为阶段 3 的稳定值电流密度随干扰电压的变化，当干扰电压升高时，阶段

3 中的电流密度稳定值先升高，后降低，在干扰电压为 200 V 时达到最大，为 68.6 A/m^2。



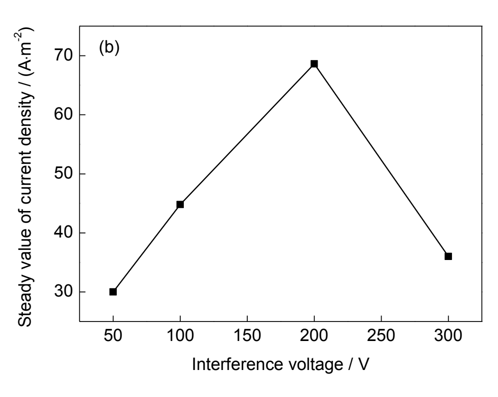


图 3 峰值电流密度和稳定值电流密度随干扰电压的变化规律

Fig.3 Variation of peak value (a) and steady value (b) of current density with interference voltage

2. 3 高压直流干扰模拟实验过程中试样周围局部环境参数变化规律

干扰过程中试样表面 1 cm 处土壤温度均有不同程度的升高，如图 4 所示。当干扰电压为 50 和 100 V 时，土壤温度持续升高；当干扰电压为 200 和 300 V 时，土壤温度有明显的上升-下降过程，干扰电压为 200 V 时，土壤温度在数分钟之内达到 34 ℃，然后略有下降；当干扰电压为 300 V 时，土壤温度先迅速升高到 52 ℃，然后快速下降到 35 ℃，此后略有下降。需要说明的是，在搭建实验装置时，为了尽量减小对试样表面电流分布的影响，温度计被放置于距离试样表面 1 cm 处，因此上述温度结果要低于试样表面和近表面土壤的温度。

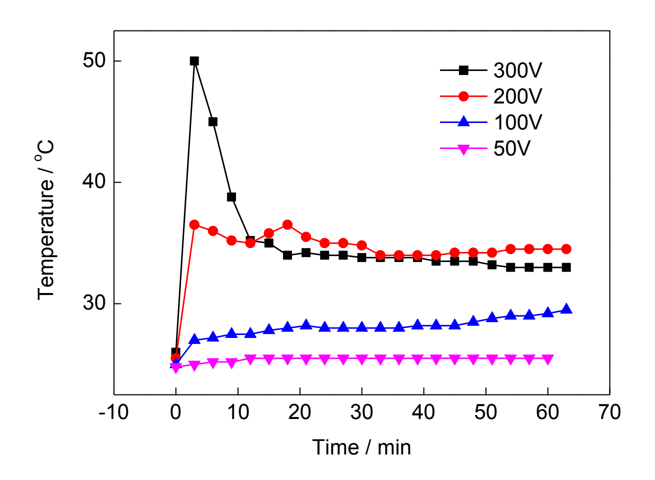


图 4 高压直流干扰过程中试片表面 1 cm 处的土壤温度变化

Fig.4 Variation of soil temperature at 1 cm away from coupon under HVDC interference

干扰结束后，将试样表面 0.5 cm 内，以及距试样 1 和 10 cm 处的土壤取出，测得土壤含水率如图 5 所示，其中虚线为干扰实验前含水率，其它曲线代表与试样不同间距处土壤的含水率。从图中可知，施加高压直流干扰后，距离试样 0.5 和 1 cm 处土壤含水率有明显的下降：在同一位置时，直流干扰电压越高，含水率下降幅度越大；在同一干扰电压时，土壤越靠近试样，含水率下降幅度越大，土壤受试样影响越明显。而距离试样 10 cm 处，土壤含水率均非常接近 21%，相当于实验初始含水率。这表明 50~300 V 干扰电压下，土壤受试样反应的影响范围小于 10 cm，且越靠近试样表面，土壤受影响越大，例如当干扰电压为 300 V 时，干扰后距试样表面 1 cm 处土壤含水率由 21%下降至 12.5%，距试样表面 0.5 cm 内土壤含水率下降至 9.9%。

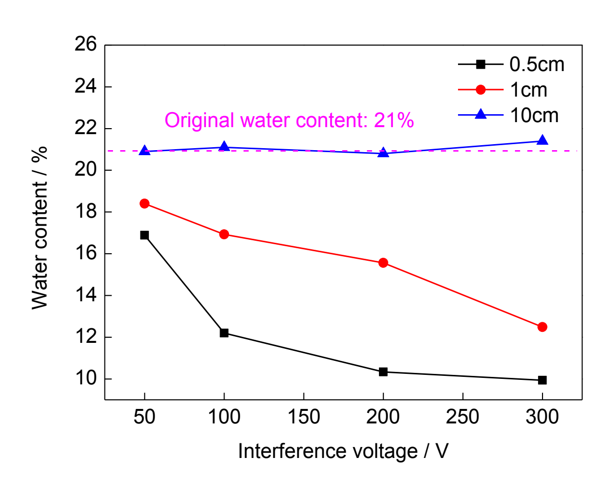


图 5 高压直流干扰施加前后试样表面不同距离处土壤含水率

Fig.5 Variation of soil water content at different distance from coupon surface before and after high voltage direct current interference

试片到参比电极之间的电阻为 R_{soil}，体现了试片表面土壤电阻率的变化。干扰实验前后测得的 R_{soil} 如图 6 所示。干扰前 R_{soil} 约为 3500 Ω，干扰后 R_{soil} 增大，且干扰电压越高，R_{soil} 越大。当干扰电压为 50~300 V 时，干扰后 R_{soil} 分别为 15398、22130、28059、83025 Ω。

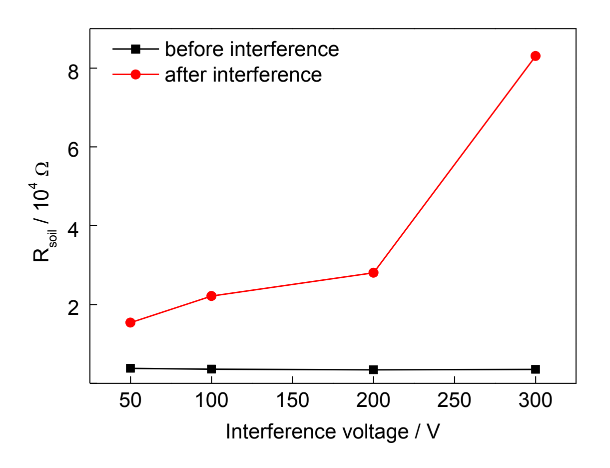


图 6 干扰前后土壤扩散电阻 R_{soil} 变化

Fig.6 Variation of spread resistance (R_{soil}) before and after high voltage direct current interference

2.4 腐蚀产物分析及腐蚀失重与腐蚀速率测试结果

X80 钢试样在广东土壤中施加 50～300 V 高压直流干扰 1 h 后，试样表面均有不同程度的腐蚀。腐蚀产物宏观形貌如图 7 所示。由图 7 可见，腐蚀产物主要为红褐色，质地较疏松，且与钢铁基体结合并不紧密，用清水可以轻易冲掉。将试样与表面土壤分离时部分腐蚀产物会脱落，且部分土壤成分难以分离而留在试样表面。

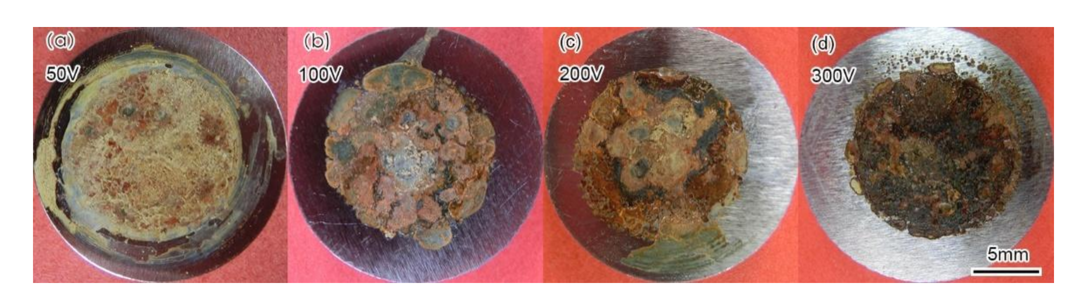


图 7 X80 钢在 50~300 V 直流电位干扰 1 h 后的腐蚀形貌

Fig.7 Macro morphologies of X80 steel coupons after high voltage direct current interference at 50 V (a), 100 V (b), 200 V (c) and 300 V (d) for 1 h

对腐蚀产物进行 Raman 光谱分析，如图 8 所示。可见不同直流干扰电位下腐蚀产物的峰值很相似，约为 215、285、390、605 和 1300 cm^{-1}，最强峰出现在 285 cm^{-1}，参考其它腐蚀过程中锈层的拉曼光谱分析[21~24]可知，在高压直流干扰下主要腐蚀产物为 α-Fe_2O_3。

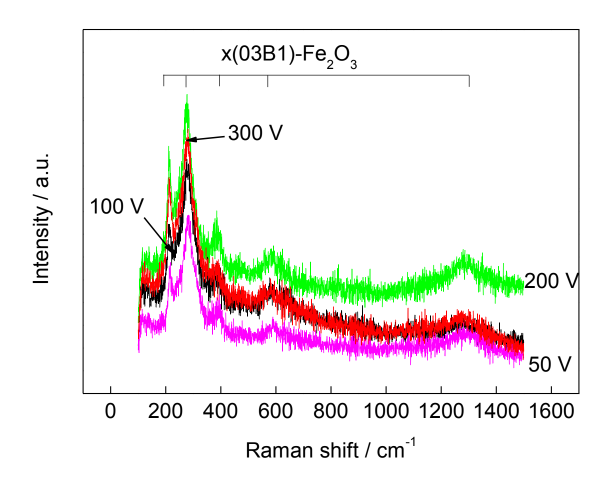


图 8 不同高压直流干扰下腐蚀产物的 Raman 光谱

Fig.8 Raman spectra of rust after high voltage direct current interference at different voltages

酸洗后得到试样失重数据和腐蚀速率数据如表 1 所示。从表中可以看出，随着干扰电压的升高，腐蚀速率先增大后减小，在干扰电压为 200 V 时达到最高，为 10.63 μm/h；在干扰电压为 300 V 时反而有所下降，为 7.78 μm/h。这种规律与直流电流密度稳定值的变化相似。

表 1 X80 钢在 50~300 V 直流干扰电压下的失重与腐蚀速率

Table 1 Weight loss and corrosion rate of X80 steel under 50～300 V high voltage direct current interference

Voltage / V	Weight loss / mg	Corrosion rate / (μm h^{-1})
50	3.42	5.56
100	5.90	7.85
200	8.74	10.63
300	5.25	7.78

3 分析讨论

3.1 高压直流干扰下试样电流密度变化原因分析

如前所述，高压直流干扰过程中电流密度在阶段 2 有明显的快速下降，这种快速下降过程与试样表面的土壤物性变化密切相关。

在电位测试过程中，当有外界直流电流经试样时，所测得直流干扰电位即通电电位中会包含介质中的土壤电压降，如式(3)所示[15,16]：

$$E_{on} = E_p + I_{DC} \cdot R_{soil} = E_p + J_{DC} \cdot A \cdot R_{soil} \tag{3}$$

其中，E_{on} 为直流干扰电位(通电电位)测试结果；E_p 为极化电位；I_{DC} 为流经试样的直流电流；I_{DC} R_{soil} 为土壤中的电压降，表示从工作电极表面到参比电极之间的土壤分压；J_{DC} 为直流电流密度。

在 50~300 V 高压直流干扰过程中，直流干扰电压即 E_{on} 基本保持不变，而在干扰过程中用断电法测得 E_p 约为-0.5~0.5 V (*vs* SCE)，远小于 E_{on}，因此， J_{DC} 可表示为：

$$J_{DC} = \frac{E_{on} - E_p}{A \cdot R_{soil}} \approx \frac{E_{on}}{A \cdot R_{soil}} \tag{4}$$

在高压直流干扰中， J_{DC} 与 R_{soil} 呈反比关系。由图 6 可知，干扰后 R_{soil} 有大幅增长，可增大几十倍，这与 J_{DC} 的大幅下降速率一致。

实际上，采用式(4)计算得到的 J_{DC} 稳定值如表 2 所示。从表中可知，J_{DC} 的计算值与实测值非常接近，误差很小，随着干扰电位的升高也呈现先升高、后降低的趋势。这证实了电流密度与土壤物性的相关性，即干扰过程中直流电流密度的大幅降低是由 R_{soil} 的大幅增长引起的。

表 2 干扰结束时电流密度实测值与计算值比较

Table 2 Comparison of measured current density and calculated current density after HVDC interference

Voltage / V	Measured current density / (A cm^{-2})	Calculated current density by formula (4) / (A cm^{-2})	Error / %
50	30	32.47	8.23
100	44.8	45.19	0.87
200	68.6	71.27	3.89
300	36	36.13	0.36

Nielsen 等[17~20]认为，当土壤中的试片上有外电流流过时，由于电力线在介质中传播时集中于试样表面，R_{soil} 能反应试样表面土壤的性质，且与土壤电阻率、温度、离子浓度等参数密切相关。曹晓斌等[25]指出，当土壤通入直流电流时，直流电流会影响离子浓度和离子迁移数，进而引起土壤电阻率的变化。Huang 等[26]认为，随着直流电流密度的升高，土壤电阻率呈现先升高、后降低的趋势，但没有考虑到直流电流的热效应。Sima 等[27,28]指出，当直流电流密度较高时，土壤中会出现热效应，加快水分蒸发，造成土壤电阻率大幅升高。结合图 4 和 5 可知，干扰过程中试样表面土壤温度升高，含水率大幅降低，试样表面土壤电阻率大幅升高，造成了 R_{soil} 显著增大。

结合以上分析，可以得出电流密度变化的原因。(1) 阶段 1：刚施加干扰时，由于外加较高直流电位，试样/土壤界面上迅速发生电化学反应，电流密度迅速升高到峰值；(2) 阶段 2：峰值电流密度较高，导致电化学反应放热和电阻热较高，试样与表面土壤温度升高，加快了土壤中水分的蒸发，造成土壤含水率下降以及土壤电阻的升高，在干扰电压恒定的情况下，电流密度逐渐降低；(3) 阶段 3：当电流密度降低到稳定值时，试样表面放热减少，并与热量的向外传导达到平衡，由于水在试样周围土壤中形成浓度梯度，发生了渗透现象，并且渗透作用与蒸发作用达到平衡。因此电流密度能保持相对稳定。

高压直流干扰中，干扰前 R_{soil} 大致相等，因此峰值电流密度主要与干扰电位相关，随着干扰电位的增大而升高；而稳定值电流密度是干扰电位、热量的产生与扩散、水分的渗透、土壤结构与物化性质等多种因素共同作用、维持平衡的结果，因此电流密度稳定值与干扰电位不呈正相关关系，在本实验条件下当直

流干扰电位为中等电压(200 V)时电流密度稳定值最高。

3.2 高压直流干扰腐蚀风险及腐蚀速率与电流密度的相关性分析

高压直流干扰腐蚀风险的大小及有效评估方法的建立是实际生产中最为关注的问题，根据表 1 所示的实验结果，在广东土壤中，干扰电位分别为 50、100、200 及 300 V 条件下，对应的腐蚀速率分别为 5.56、7.85、10.63 及 7.78 μm/h；一般情况下高压直流输电工程的设计标准为每年 1%的单极运行时间[1]，据此推算，在本实验直流干扰电位 50、100、200 及 300 V 条件下，对应试片年腐蚀速率分别约为 0.486、0.687、0.931 及 0.681 mm/a。

同时可以看出，高压直流干扰过程中腐蚀速率随直流干扰电位的升高呈现先增大后减小的趋势；当直流干扰电位为 200 V 时达到最大值，当直流干扰电位为 300 V 时腐蚀速率反而有所下降。其变化规律与图 3a 中电流密度峰值随直流干扰电位变化的线性关系差异较大，而与图 3b 中电流密度稳定值随直流干扰电位的变化规律很相似。

由于电流密度是影响腐蚀速率的重要参数，根据图 2 中显示的高压直流干扰过程中电流密度变化曲线，峰值电流密度以及稳定值电流密度，结合 Faraday 定律，分别计算了 3 种电流密度情况下对应的理论腐蚀速率。

根据 Faraday 定律，其电化学反应速率 R 为：

$$R = \frac{i}{nFA} = \frac{j}{nF} \tag{5}$$

其中，i 为流经试样的电流，j 为电流密度，n 为电化学反应中消耗或生成的电子数，F 为 Faraday 常数。考虑到试样可能发生的反应：

$$Fe \rightarrow 2e + Fe^{2+} \tag{6}$$

则理论上 X80 钢在不同干扰下的腐蚀失重 w 为：

$$w = \int_0^t R \cdot A \cdot M \cdot dt \tag{7}$$

其中，M 为反应物的摩尔质量；t 为反应时间。根据式(7)和(2)计算反应的理论腐蚀速率。以 300 V 直流干扰电位情况下的数据为例，对于考察的 3 种电流密度情况，电流密度变化曲线法计算腐蚀速率采用电流密度曲线积分的形式，如图 9 所示。峰值电流密度采用 868.5 A/m^2，稳定值电流密度采用 36 A/m^2。

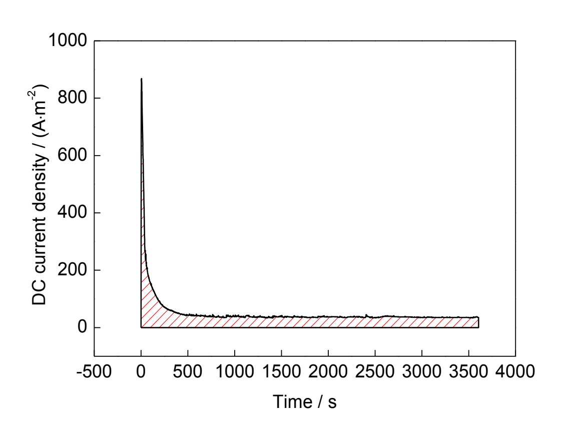


图 9 300 V 干扰电压下利用电流密度曲线计算腐蚀速率

Fig.9 Corrosion rate calculation by current density curve under 300 V high voltage direct current interference

根据 3 种电流密度计算得到的腐蚀速率及与失重腐蚀速率的相对误差见表 3。由表 3 可知，利用电流密度变化曲线积分计算得到的腐蚀速率与失重法测量得到的腐蚀速率较为接近，误差最小；利用电流密度稳定值计算得到的腐蚀速率与实际有一定偏差，误差为 14.57%~38.70%；利用电流密度峰值计算得到的腐

蚀速率与实际腐蚀速率存在较大误差，是实际腐蚀速率的若干倍。

上述结果说明，实际高压直流干扰中可以利用监测电流密度的方法，结合 Faraday 定律来预测腐蚀速率。最准确的方法是监测电流密度随时间的变化曲线，通过面积积分计算获得腐蚀速率；如果能检测到干扰中后期的电流密度稳定值，也可根据该值粗略估计腐蚀速率，虽然与实际的腐蚀速率存在一定误差，但在工程上仍有一定的应用价值；但不建议采用干扰初期的峰值电流密度来评估腐蚀速率，会造成较大的误差。

表 3 3 种电流密度计算得到的腐蚀速率与误差

Table 3 Corrosion rate and errors calculated by three kinds of current density

Interference voltage / V	Measured corrosion rate / (μm h^{-1})	Current density curve		Peak current density		Steady current density	
		Corrosion rate / (μm h^{-1})	Error / %	Corrosion rate / (μm h^{-1})	Error / %	Corrosion rate / (μm h^{-1})	Error / %
50	5.56	4.32	22.33	10.59	90.64	3.97	28.51
100	7.85	7.25	7.64	32.16	309.84	5.93	24.40
200	10.63	10.74	0.99	69.24	551.21	9.08	14.57
300	7.78	6.64	14.63	115.01	1378.97	4.77	38.70

4 结论

(1) 广东土壤中 X80 钢试样在 50~300 V 直流干扰电位下，电流密度随时间呈现典型的 3 阶段变化特征：先在几秒内急剧上升到较高水平的峰值，然后在几百秒内下降到较低水平的稳定值，最后维持在稳定值上下较长时间。结合干扰过程中试样附近土壤温度、含水率及电阻的测试分析表明，电流密度的变化主要是因为大幅干扰电压造成短时间内试片周围土壤温度升高，含水率降低，局部电阻率大幅增加所致。

(2) 在本实验条件下，直流干扰电位分别为 50、100、200 及 300 V 情况下，对应的腐蚀速率分别为 5.56、7.85、10.63 及 7.78 μm/h；腐蚀速率随直流干扰电位的升高呈现先增大后减小的趋势，该趋势不同于电流密度峰值随直流干扰电位的变化规律，但与电流密度稳定值随直流干扰电位的变化规律相似。

(3) 根据 Faraday 定律，分别计算了 3 种形式的电流密度对应的理论腐蚀速率，并和失重腐蚀速率进行了对比，结果表明利用高压直流干扰过程中电流密度变化曲线积分计算得到的腐蚀速率与失重腐蚀速率误差最小；其次为利用电流密度稳定值计算得到的腐蚀速率；利用电流密度峰值计算得到的腐蚀速率与失重腐蚀速率误差最大，可达到失重腐蚀速率的若干倍。据此提出了实际高压直流干扰下参数监测与腐蚀速率的预测方法。

参考文献

[1] Zhao W J. High Voltage Direct Current Engineering Technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 1

(赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 1)

[2] Shu Y B, Liu Z H, Gao L Y, et al. A preliminary exploration for design of ±800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6400 MW [J]. Power Sys. Technol., 2006, 30(1): 1

(舒印彪，刘泽洪，高理迎等. ±800kV 6400MW 特高压直流输电工程设计 [J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1)

[3] Liu Z H, Gao L Y, Yu J. Study on ±800 kV UHVDC transmission technology [J]. Electric Power Construction, 2007, 28(10): 17

(刘泽洪，高理迎，余 军. ±800kV 特高压直流输电技术研究 [J]. 电力建设, 2007, 28(10): 17)

[4] Zhan Y, Yin X G. Comparative research on HVDC and UHVC power transmission [J]. High Voltage Eng., 2001, 27(4): 44

(詹 奕，尹项根. 高压直流输电与特高压交流输电的比较研究 [J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 44)

[5] Larruskain D M, Abarrategui O, Zamora I, et al. Transmission and distribution networks: AC versus DC [A]. 9th Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering [C]. Marbella: AEDIE and APDEE, 2005: 245

[6] Zhou H, Zhong Y J. Applicable occasions of UHVAC/UHVDC transmission and their technology comparisons in China [J]. Electric Power Automation Equip., 2007, 27(5): 6

(周 浩, 钟一俊. 特高压交、直流输电的适用场合及其技术比较 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 6)

[7] Verhiel A J. The effects of high-voltage DC power transmission systems on buried metallic pipelines [J]. IEEE Trans. Ind. General Appl., 1971, (3): 403

[8] Nicholson P. High voltage direct current interference with underground/underwater pipelines [A]. Proceedings of the Corrosion 2010 [C]. San Antonio: NACE International, 2010: 10102

[9] Caroli C E, Santos N, Kovarsky D, et al. Itaipu HVDC ground electrodes: Interference considerations and potential curve measurements during Bipole II commissioning [J]. IEEE Trans. Power Delivery 1990, 5:1583

[10] Hopper A T, Gideon D N, Berry W E, et al. Analysis of the effects of high-voltage direct-current transmission systems on buried pipelines [R]. Falls Church: PRCI, 1967

[11] Bi W X, Chen H Y, Li Z J, et al. HVDC interference to buried pipeline: numerical modeling and continuous p/s potential monitoring [A]. Proceedings of the Corrosion 2016 [C]. Vancouver: NACE International, 2016: 7714

[12] Ying B. The influence of HVDC system ground electrode on safe operation of long-distance pipeline [J]. Oil-Gas Field Surf. Eng., 2014, 33(7): 23

(应 斌. 高压直流输电系统接地极对长输管道安全运行的影响 [J]. 油气田地面工程, 2014, 33(7): 23)

[13] Gong Y, Xue C, Yuan Z, et al. Advanced analysis of HVDC electrodes interference on neighboring pipelines [J]. J. Power Energ Eng, 2015, 3(4):332

[14] Qin R Z, Du Y X, Peng G Z, et al. High voltage direct current interference on buried pipelines：Case study and mitigation design [A]. Proceedings of the Corrosion 2017 [C]. New Orleans: NACE International, 2017: 9049

[15] Bard A J, Faulkner L R. Electrochemical methods: fundamentals and applications [M]. New York: Wiley, 2000: 16

[16] Cao C N. Principles of electrochemistry of corrosion [M]. 3nd Ed., Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 158

(曹楚南. 腐蚀电化学原理(第三版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 158)

[17] Nielsen L V, Rosenberg H, Baumgarten B, et al. AC Induced Corrosion in Pipelines: Detection, Characterization and Mitigation[A]. Proceedings of the Corrosion 2004 [C]. New Orleans: NACE International, 2004: No.04211

[18] Nielsen, L V, Galsgaard F. Sensor technology for on-line monitoring of AC induced corrosion along pipelines [A]. Proceedings of the Corrosion 2005 [C]. Houston: NACE International, 2005: No.05375

[19] Nielsen, L V, Nielsen, K V. Differential ER-technology for measuring degree of accumulated corrosion as well as instant corrosion rate [A]. Proceedings of the Corrosion 2003 [C]. San Diego: NACE International, 2003: No.03443

[20] Nielsen, L. V. Role of alkalization in AC induced corrosion of pipelines and consequences hereof in relation to CP requirements [A]. Proceedings of the Corrosion 2005 [C]. Houston: NACE International, 2005: No.05188

[21] Froment F, Tournié A, Colomban P. Raman identification of natural red to yellow pigments: ochre and iron-containing ores [J]. J. Raman Spectrosc, 2008, 39: 560

[22] Duennwald J, Otto A. An investigation of phase transitions in rust layers using Raman spectroscopy [J]. Cheminform, 1989, 29:1167

[23] Xing X C, Li X G, Xiao K, et al. Corrosion behaviors at the initial stage of q235 steel in Xisha atmosphere [J]. J. Chin. Soc. Corros Prote, 2009, 29: 465

[24] Chitra P, Rajaram R, Venkatesh P. Raman identification of corrosion products on automotive galvanized steel sheets [J]. J. Raman Spectrosc, 2010, 39: 881

[25] Cao X B, Wu G N, Fu L H, et al. The impact of dc current density on soil resistivity [J]. Proceeding CSEE, 2008, 28(6): 37

(曹晓斌, 吴广宁, 付龙海,等. 直流电流密度对土壤电阻率的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 37)

[26] Huang Z, Wu G, Jiang W, et al. Study of the influences on soil resistivity caused by HVDC mono-polar operation [A]. International Conference on High Voltage Engineering and Application [C]. Chongqing: IEEE, 2009: 232

[27] Sima W, Luo L, Yuan T, et al. Experimental analysis on the change regulation of the soil resistivity considering the thermal effect around the grounding electrode [A] Asia-Pacific International Conference on Lightning [C]. Chengdu: IEEE, 2011: 673

[28] Sima W X, Luo L, Yuan T, et al. Temperature characteristic of soil resistivity and its effect on the DC grounding electrode heating [J]. High Voltage Eng., 2012, 38: 1192

(司马文霞, 骆 玲, 袁 涛,等. 土壤电阻率的温度特性及其对直流接地极发热的影响 [J]. 高电压技术, 2012, 38: 1192)

[29] NACE SP0169-2013, Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems [S]. Houston: NACE International, 2013